

University of Groningen

Sulphur, zinc and carbon in the Sculptor dwarf spheroidal galaxy

Skúladóttir, Ása

IMPORTANT NOTE: You are advised to consult the publisher's version (publisher's PDF) if you wish to cite from it. Please check the document version below.

Document Version

Publisher's PDF, also known as Version of record

Publication date:

2016

[Link to publication in University of Groningen/UMCG research database](#)

Citation for published version (APA):

Skúladóttir, Á. (2016). *Sulphur, zinc and carbon in the Sculptor dwarf spheroidal galaxy*. [Thesis fully internal (DIV), University of Groningen]. Rijksuniversiteit Groningen.

Copyright

Other than for strictly personal use, it is not permitted to download or to forward/distribute the text or part of it without the consent of the author(s) and/or copyright holder(s), unless the work is under an open content license (like Creative Commons).

The publication may also be distributed here under the terms of Article 25fa of the Dutch Copyright Act, indicated by the "Taverne" license. More information can be found on the University of Groningen website: <https://www.rug.nl/library/open-access/self-archiving-pure/taverne-amendment>.

Take-down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

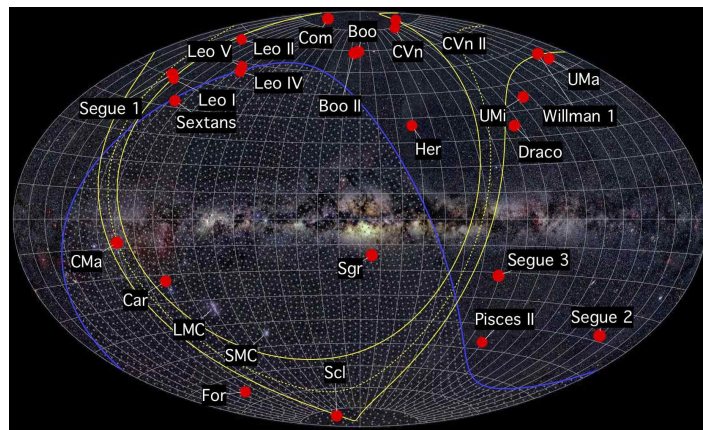
Downloaded from the University of Groningen/UMCG research database (Pure): <http://www.rug.nl/research/portal>. For technical reasons the number of authors shown on this cover page is limited to 10 maximum.

Íslensk samantekt

Stjarnfornleifafræði í Grenndarhópnum

Af öllum þeim milljónum stjörnuþoka sem eru í heiminum, þá eru nokkrar tylftir þeirra sérstaklega áhugaverðar, vegna þess hve nálægt þær eru Sólkerfinu. Þessar stjörnuþokur tilheyra hinum svokallaða Grenndarhópi (*e. Local Group*), sem samanstendur að mestu leyti af tveimur stórum þyrilstjörnuþokum, Vetrarbrautinni og Andrómedu, en þar að auki er fjöldinn allur af dvergstjörnuþokum af ýmsum stærðum og gerðum. Meira en 30 þekktar dvergstjörnuþokur eru á sporbaug um Vetrarbrautina, sjá Mynd 1. Nýlega hafa fjöldamargar nýjar, litlar og daufar, dvergstjörnuþokur verið uppgötvaðar, og er búist við að fleiri muni koma í ljós á næstu árum.

Allar stjörnuþokur eru gerðar úr mismunandi magni og samsetningu af hulduefni, ryki og gasi, stjörnum og stjörnuleifum. Stjörnur myndast úr köldum gas-skýjum og hafa skapað öll frumefni í heiminum, þyngrri en vetni og helíum. Gegn-



Mynd 1: Vetrarbrautin og dvergstjörnuþokur á braut um hana. Athugið Sculptor (Scl) neðarlega á myndinni (fengið frá: H. Jerjen & ESO).

um tímann hefur mörgum þessara frumefna, eða *málma*⁵, verið dreift um umhverfið, aðallega með orkumiklum sprengistjörnum. Næstu kynslóðir stjarna myndast því úr gasi sem hefur verið auðgað af málmi, og eftir því sem tíminn líður eykst þetta magn málma í umhverfinu, og nýjar stjörnur verða málmríkari en forverar þeirra. Massalitlar stjörnur geta haft líftíma sem er sambærilegur við aldur alheimsins. Yfirborð þessara stjarna helst í flestum tilvikum nánast óbreytt frá upphafi, fram til dagsins í dag, og hægt er að líta á þær sem nokkurs konar fornminjar sem geyma upplýsingar um umhverfið sem þær mynduðust úr. Með því að skoða stjörnur af mismunandi aldri getum við því fengið nákvæma innsýn inn í sögu frumefnanna í stjörnuþokunni þar sem þær urðu til.

Til þess að mæla magn málma, (e. *metallicities*), og fá nákvæmt yfirlit yfir efnasamsetningu stjarna er nauðsynlegt að rannsaka litróf þeirra. Öll frumefni og sameindir hafa vel skilgreindar litrófslínur, og ræðst styrkur þeirra bæði af magni efnanna, og eiginleikum stjarnanna sjálfra (s.s. hitastigi og þyngdarafli á yfirborði).

Í Vetrarbrautinni og nálægum dvergstjörnuþokum getum við fengið hágæða litróf af einstökum stjörnum, sem er ekki hægt ef farið er út fyrir Grenndarhópinn. Því er mögulegt að rannsaka í smáatriðum, stjörnu fyrir stjörnu, hvernig hin ýmsu frumefni safnast upp yfir líftíma stjörnuþoka. Ólíkar tegundir af stjörnum skilja eftir sig mismunandi samsetningu af frumefnum. Með því að rannsaka hvernig efnasamsetningar í stjörnum breytast með aldri þeirra og málmamagni, kemur í ljós hvaða ferli voru mikilvæg á hvaða tíma, og hversu langan tíma uppbygging efnanna tók í efnafræðilegri þróun stjörnuþokanna.

Grenndarhópurinn er eini staðurinn í heiminum þar sem við getum rannsakað tímaháða eiginleika stakra stjörnuþoka, og mælt þá frá upphafi til dagsins í dag. Slíkar rannsóknir eru því mjög gagnlegar til viðbótar athugunum á fjarlægari stjörnuþokum þar sem er mögulegt að fá stór úrtök sem hægt er að skoða tölfræðilega, en með takmarkaðri upplýsingum um hverja og eina.

Sculptor

Megin viðfangsefni þessarar ritgerðar er dvergstjörnuþokan Sculptor, sjá Mynd 2. Sculptor var ein af fyrstu stjörnuþokunum á braut um Vetrarbrautina til að vera uppgötvuð, og árið 1938 lýsti stjarnæðlisfræðingurinn Harlow Shapley henni sem: *“Nýrri tegund af stjörnukerfi”*.

Sculptor er mjög gömul stjörnuþoka. Meginþorri stjarnanna myndaðist fyrir meira en 10 milljörðum ára, og engar stjörnur hafa orðið til nýlega. Dvergstjörnuþokur á borð við Sculptor, eru með algengustu tegundunum af stjörnuþokum í heiminum, og hár aldur stjarnanna gerir okkur kleift að rannsaka stjörnumyndun á fyrstu 1-4 milljörðum ára alheimsins.

⁵ Í stjarnæðlisfræði eru öll frumefni þyngri en helíum kölluð málmar.



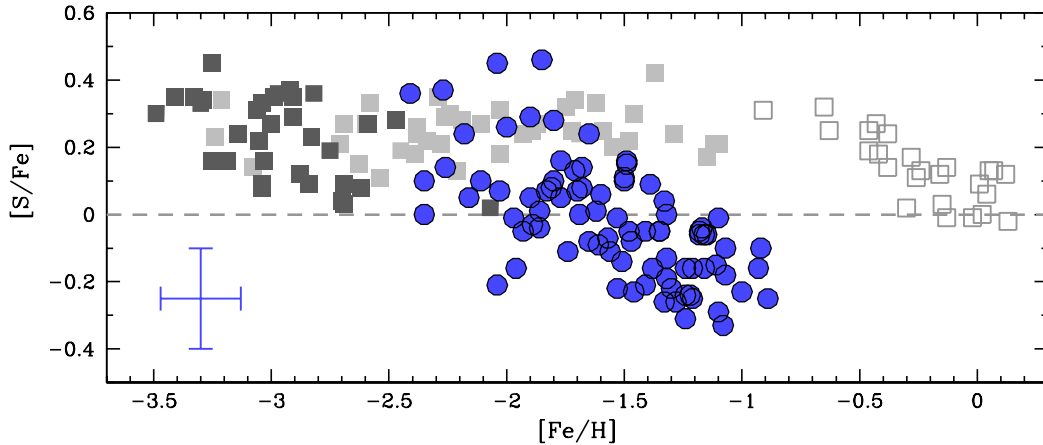
Mynd 2: Miðja dvergstjörnuþokunnar Sculptor, alls 0.4×0.4 gráður á himninum (fengið frá: Thomas de Boer).

Þessi litla stjörnuþoka er á suðurhveli himins, á hárri breiddargreiðu, sjá Mynd 1. Heildarmassi Sculptors er um $1/3000$ af massa Vetrarbrautarinnar ($M_{tot} = 3.4 \cdot 10^8 M_{\odot}$) og hún er í um 280 þúsund ljósára fjarlægð frá Sólkerfinu. Í þessari fjarlægð er aðeins fýsilegt að taka litróf í hárri upplausn af allra björtustu stjörnunum (rauðum risum), en slík litróf eru nauðsynleg til að mæla nákvæma efnasamsetningu stjarna.

Í stjarnfornleifafræði er magn járns oft notað til að meta heildarmagn málma í stjörnum, meðal annars vegna þess að það er tiltölulega auðvelt að mæla. Meðalstjarnan í Sculptor hefur $[\text{Fe}/\text{H}] = -2$, þ.e. $1/100$ af járn magni sólar.⁶ Málma-magn hjá stjörnum í Sculptor nær yfir breitt svið, þar sem málmríkustu stjörnu-urnar hafa $[\text{Fe}/\text{H}] \approx -1$ ($1/10$ miðað við Sólina), en málmrýrustu stjörnu-urnar sem fundist hafa eru með $[\text{Fe}/\text{H}] \approx -4$ ($1/10,000$ af Sólarmagninu).

Síðustu 15 ár eða svo hafa verið gerðar nákvæmar mælingar á efnasamsetningu einstakra stjarna í dvergstjörnuþokunni Sculptor. Markmiðið með þessari ritgerð er að útvíkka þessa þekkingu enn frekar, með því að mæla magn brennisteins (kaflí 3) og sinks (kaflí 4) í ~ 90 stjörnum, sem og nákvæma efnasamsetningu á mjög einstakri kolefnisríkri málmrýrri stjörnu í þessari stjörnuþoku (kaflí 5).

⁶ Magn frumefna í stjarneldisfræði er almennt skilgreint á lógaritmískum kvarða, $[\text{X}/\text{Y}] = \log(N_x/N_y)_{\star} - \log(N_x/N_y)_{\odot}$, þar sem N er fjöldi atóma af frumefnum X og Y á hvern sólar massa. Á þessum skala er $[\text{X}/\text{Y}] = 0$ sama hlutfall efnanna og mælist í Sólinni, $[\text{X}/\text{Y}] = -1$ svarar til $1/10$ af Sólárlutfallinu, $[\text{X}/\text{Y}] = -2$ til $1/100$, o.s.frv.



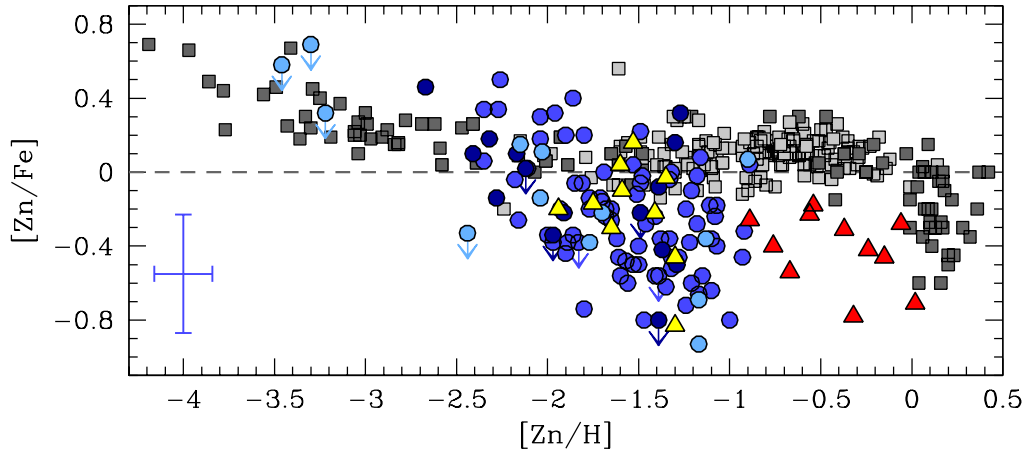
Mynd 3: Hlutfall brennisteins og járns sem fall af $[\text{Fe}/\text{H}]$ í rauðum risum í Sculptor (bláir hringir) og Vetrarbrautinni (grá tákn). Meðalóvissa fyrir stjörnurnar í Sculptor er sýnd með bláum krossi. (Til samanburðar, þá hefur Sólin $[\text{Fe}/\text{H}] = 0$ og $[\text{S}/\text{Fe}] = 0$.) Fyrir heimildir og nánari útskýringar, sjá mynd 3.7.

Brennisteinn & sink í Sculptor

Heildarmagn málma í stjörnum, og almenn efnasamsetning og hlutföll einstakra frumefna eru mjög háð efnafræðilegri þróunarsögu kerfisins sem þær voru myndaðar í. Skýrt dæmi um þetta er hlutfall α -frumefna (þar sem kjarninn er gerður úr mörgum α -ögnum, þ.e. tveimur róteindum og tveimur nifteindum) og járns. Hlutfallið, $[\alpha/\text{Fe}]$, ræðst aðallega af framlagi tveggja tegunda sprengistjarna: i) Gerð II, sem er dauði stórri stjarna ($\sim 8 - 40$ sólmassar) sem springa eftir ~ 10 milljón ár og dreifa miklu magni af α -frumefnunum; ii) Gerð Ia, sem verða meðal tvístirna þegar massi flyst yfir á hvítan dverg og veldur sprengingu. Þetta gerist 1-2 milljörðum ára eftir myndun stjarnanna, og með þessari gerð sprengistjarna dreifast mestmegnis járn og önnur skyld efni (svo sem Cr og Ni) umhverfið.

Snemma í sögu allra stjörnuþoka fer framleiðsla og dreifing málma fyrst og fremst fram með sprengistjörnum af gerð II, þar sem þær gerast á mjög stuttum tíma, á stjarnfræðilegum mælikvarða. Á þessu tímabili eru hlutföll α -frumefna og járns því venjulega hærri en í nágrenni Sólar, $[\alpha/\text{Fe}] > 0$. Eftir 1-2 milljarða ára, þegar sprengistjörnur af gerð Ia byrja að hafa áhrif á umhverfi sitt (með því að dreifa miklu magni af járni) þá lækkar hlutfallið af $[\alpha/\text{Fe}]$ í næstu kynslóðum stjarna.

Í stjörnum Vetrarbrautarinnar hefur verið sýnt fram á að brennisteinn hagar sér líkt og önnur α -frumefni, en þar til nú hefur ekki verið gerð nein alhliða rannsókn á þessu frumefni í stjörnum í öðrum stjörnuþokum. Í þessari ritgerð voru litróf með hárrí upplausn notuð til að ákvarða magn brennisteins í 85 stjörnum í dvergstjörnuþokunni Sculptor, með járnmagn á bilinu $-2.5 \leq [\text{Fe}/\text{H}] \leq -0.9$ (sjá kafla 3).

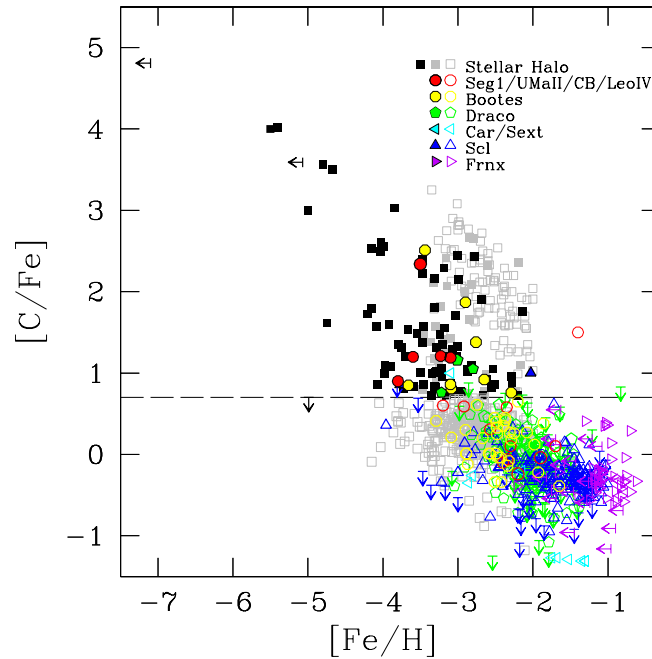


Mynd 4: Hlutfall sinka og járns, sem fall af $[\text{Fe}/\text{H}]$, í rauðum risum í Sculptor (bláir hringir), dvergstjörnuþokunum Carina (gulir þríhyrningar) og Sagittarius (rauðir þríhyrningar), sem og stjörnum í mismunandi hlutum Vetrarbrautarinnar (gráir ferningar). (Til samanburðar, þá hefur Sólin $[\text{Fe}/\text{H}] = 0$ og $[\text{Zn}/\text{Fe}] = 0$.) Fyrir heimildir og nánari útskýringar, sjá mynd 4.17.

Brennisteinsmagn í stjörnum í Sculptor sýnir sömu hegðun og sjá má hjá öðrum α -frumefnum í þessari stjörnuþoku (eins og Mg, Si og Ca), sjá mynd 3. Fyrir málmrýrar stjörnur, $[\text{Fe}/\text{H}] \leq -2$ (venjulega elstu stjörnurnar), þá eru niðurstöðurnar í samræmi við fast gildi, svipað því sem að mælist í Vetrarbrautinni, $[\text{S}/\text{Fe}] \approx +0.2$. Eftir því sem að $[\text{Fe}/\text{H}]$ eykst, þá lækkar hlutfallið $[\text{S}/\text{Fe}]$, og nær loks neikvæðum gildum við $[\text{Fe}/\text{H}] \gtrsim -1.5$. Þetta hlutfall, $[\alpha/\text{Fe}]$, er því hægt að nota sem tímaskala, til að mæla hvenær framlag sprengistjarna af gerð Ia fer að verða mikilvægt. Í Vetrarbrautinni gerist þetta í kringum $[\text{Fe}/\text{H}] \gtrsim -1$, meðan í minni stjörnuþokunni Sculptor var myndun stjarna ekki eins skilvirk og gasið var aðeins auðgað upp í $[\text{Fe}/\text{H}] \approx -1.8$, á sama tímabili.

Þegar myndun stjarna í Sculptor stöðvaðist, fór framlag sprengistjarna af gerð Ia að verða meira og meira ríkjandi, þar til neikvæðum gildum á $[\alpha/\text{Fe}]$ var náð. Í Vetrarbrautinni var hins vegar stöðugt framboð af sprengistjörnum af gerð II sem unnu gegn lækkun $[\alpha/\text{Fe}]$, svo þessi hlutföll verða ekki eins lág. Neikvæð gildi á $[\alpha/\text{Fe}]$, þ.e. þegar hlutfallið er lægra en í Sólinni, eru því mjög algeng fyrir nálægar dvergstjörnuþokur þar sem myndun stjarna hefur stöðvast.

Mælingar voru einnig gerðar á frumefninu sink (Zn) í ~ 100 rauðum risum í dvergstjörnuþokunni Sculptor, með magn járns á bilinu $-2.7 \leq [\text{Fe}/\text{H}] \leq -0.9$ (sjá kafla 4). Þetta er stærsta safn Zn mælinga í kerfi stjarna utan Vetrarbrautarinnar. Niðurstöðurnar eru í samræmi við fyrri mælingar á takmörkuðu upplagi stjarna í Sculptor og öðrum dvergstjörnuþokum, sem sýna hegðun líka α -frumefnum, sjá mynd 4. Það er, há gildi meðal málmrýrra stjarna, og lækkandi $[\text{Zn}/\text{Fe}]$ með vaxandi $[\text{Fe}/\text{H}]$. Meðal málmríkari stjarna í Sculptor, $[\text{Fe}/\text{H}] > -1.8$, mælast mjög lág gildi á Zn sem dreifast yfir stórt bil $-0.9 < [\text{Zn}/\text{Fe}] < 0.4$. Þess-



Mynd 5: Hlutfall kolefnis og járns sem fall af $[Fe/H]$ í dvergstjörnuþokum (lituð tákn frá minnstu stjörnuþokunum í rauðu til þeirra stærstu í fjólubláu), og í Vetrarbrautinni (grá og svört tákn). Fyllt svört og lituð tákn eru CEMP-no stjörnur, fyllt grá tákn eru óflokkaðar CEMP stjörnur. Athugið fyrstu CEMP-no stjörnuna í Sculptor (blár þríhyrningur með $[Fe/H] = -2$). Fyrir heimildir og nánari útskýringar, sjá mynd 6.1.

ar niðurstöður gefa til kynna að sink eigi sér flókna sögu í Sculptor, og að það hagi sér hvorki alveg eins og α -frumefnin né fullkomlega eins og þau sem tilheyra járnþópnum, og myndun þess dreifist því mögulega á nokkra ólíka ferla.

CEMP stjörnur í dvergstjörnuþokum

Fyrstu stjörnurnar í alheiminum mynduðust úr frumstæðu efni, sem innihélt aðeins vetni, helíum, og örlítið magn af lithíum. Fjarvera málma gerði það að verkum að kæling gass var óskilvirk, sem og skipting þess í minni einingar. Líkön af myndun þessara fyrstu stjarna spá því þess vegna að þær hafi almennt verið stærri en stjörnur dagsins í dag. Mikill meirihluti þeirra hafði því stuttan líftíma⁷, og því er ekki hægt að sjá þær í Grenndarþópnum í dag. Engar beinar athuganir á málmlausri stjörnu hafa enn verið staðfestar, en leitinn heldur áfram.

Eiginleika þessara fyrstu stjarna má hins vegar rannsaka óbeint, út frá frumefnunum sem þær skildu eftir sig. Gasið sem var “mengað” af þessum frumstæðu stjörnum má skoða í dag, á yfirborði lítilla langlífra stjarna sem mynduðust úr því. Efnasamsetningin sem að þessar málmlausu stjörnur dreifðu til umhverfisins,

⁷ Almennt gildir reglan stærri stjarna, styttra líf.

ætti því að vera greinanleg á yfirborði fornra málmrýrra stjarna.

Allar stórar kannanir á málmrýrum stjörnum í Vetrarbrautinni hafa leitt í ljós að töluverður hluti allra stjarna með $[\text{Fe}/\text{H}] \leq -2.0$ hafa hlutfallslega mikið magn kolefnis (þ.e. $[\text{C}/\text{Fe}] \geq +0.7$), sjá mynd 5. Þessar stjórnur eru kallaðar kolefnisríkar málmrýrar (e. *carbon-enhanced metal-poor*) stjórnur, eða CEMP stjórnur.

Þessum CEMP stjörnum er skipt upp í undirhópa, eftir magni þungra frumefna eins og barium og europium. Af þessum undirhópum, eru svokallaðar CEMP-no stjórnur sérstaklega áhugaverðar, þar sem tíðni þeirra og umframmagn kolefnis eykst með lækkandi $[\text{Fe}/\text{H}]$, og gífurlega há gildi á $[\text{C}/\text{Fe}]$ finnast í málmrýrustu stjörnunum, sjá mynd 5. Þessar uppgötvanir hafa leitt til þeirrar niðurstöðu að magn frumefna á yfirborði CEMP-no stjarna, sýni upprunalegu efnasamsetningu fæðingastaðar þeirra, sem hafi verið mengaður af fyrstu kynslóð stjarna.

Fyrsta CEMP-no stjarnan sem var uppgötvuð í Sculptor er kynnt í þessari ritgerð. Efnasamsetning þessarar stjörnu er í samræmi við að hafa myndast úr gas-skýi sem hafði verið mengað af bæði fyrstu kynslóð stjarna og seinni kynslóðum. Til viðbótar við mikið magn kolefnis, þá hefur þessi stjarna einnig aðra óvenjulega þætti í efnasamsetningu sinni (sjá kafla 5). Uppgötvun þessarar stjörnu við óvenjulega hátt $[\text{Fe}/\text{H}] = -2$, leiddi til fræðilegrar rannsóknar á tíðni CEMP-no stjarna í dvergstjörnuþokum almennt (sjá kafla 6). Sú rannsókn leiddi m.a. í ljós að líkurnar á að finna CEMP-no stjórnur eru ekki eins í öllum dvergstjörnuþokum, heldur eru háðar því hversu margar, og á hvaða tíma skala, stjórnur mynduðust.

Lokaorð

Stjörnuþokurnar í Grenndarhópnum veita einstakt tækifæri til að rannsaka stjórnur í ótrúlegum smáatriðum. Við getum öðlast ómetanlega innsýn inn í hina ýmsu ferla í myndun og þróun stjörnuþoka. Sér í lagi, þá eru gamlar stjórnur í Vetrarbrautinni og fylgstjörnuþokum hennar mikilvægar fornminjar um efnauppbyggingu alheimsins, og geta jafnvel gefið okkur upplýsingar um fyrstu kynslóð stjarna. Dvergstjörnuþokan Sculptor er einstaklega góður kostur til að rannsaka efnauppbyggingu staks kerfis frá byrjun til enda, vegna þess að hún hefur til-
tölulega margar stjórnur, og einfalda stjörnumyndunarsögu. Á komandi árum er búist við að enn fleiri dvergstjörnuþokur á braut um Vetrarbrautina verði uppgötvaðar, sem ásamt fleiri rannsóknum á málmrýrum stjörnum munu færa okkur ennþá skýrari mynd af því hvernig hin ýmsu frumefni urðu til og dreifðust um heiminn.

